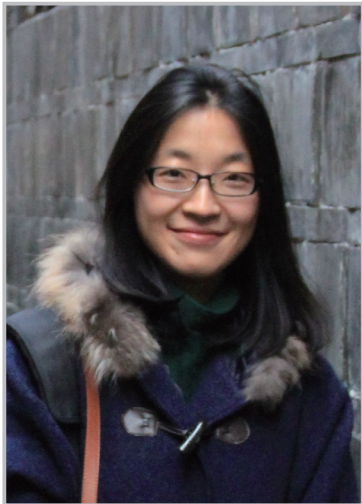


商用航空发动机整体叶盘通道加工方法分析

Slot Roughing Process Analysis of Commercial Aeroengine Blisk

中航商用航空发动机有限责任公司 闫雪 韩秀峰



闫雪

博士,毕业于西北工业大学航空宇航制造工程专业,现任中航商用航空发动机有限责任公司材料工艺部主管设计师,负责发动机零部件机械加工、特种加工技术研究。

整体叶盘最初用于军用低压压气机,而后发展用于高压压气机,目前商用航空发动机也越来越多采用整体叶盘结构。图 1^[1]所示为整体叶盘在航空发动机中的应用发展趋势。整体叶盘结构可以降低航空发动机重量,同时增加发动机工作效率,从而提升发动机推重比。同时,整体叶盘结构避免了榫头、榫槽间的微动磨

对于钛合金整体叶盘,从工艺性及经济性考虑,铣削加工是适合的加工方法,并且插铣加工及摆线铣加工均可以用于通道加工。对于镍基高温合金材料的整体叶盘,电化学加工可以实现较高的材料去除率,对于批量生产的镍基高温合金材料的整体叶盘,电化学加工的经济性更好。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.12.066

损、微观裂纹、锁片损坏等意外故障,大大提高了发动机工作寿命和安全可靠。

商用航空发动机的整体叶盘主要应用于风扇及压气机,材料多为钛合金和高温合金锻件,均属于难切削材料,如图 2 所示。

整体叶盘结构复杂,叶片型面为自由曲面,且壁薄、刚性差,加工过程中易发生变形,通道开敞性差,加工

过程中极易发生干涉。与传统的盘片分离结构相比,整体叶盘的加工及维修难度更大,因此,加工及维修成本也相应提高。发动机整体叶盘的制造工艺和维修的复杂性是目前影响其应用与推广的两大主要因素。

整体叶盘从结构形式上分为整体式和焊接式两类。焊接式是将复杂困难的叶形加工成单个叶片进行叶型加工,焊接精度和焊缝质量与整

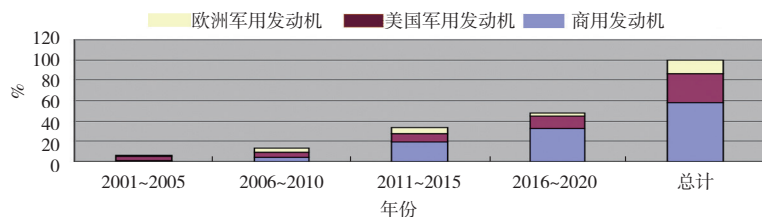


图1 整体叶盘在军用及民用航空发动机中的应用发展

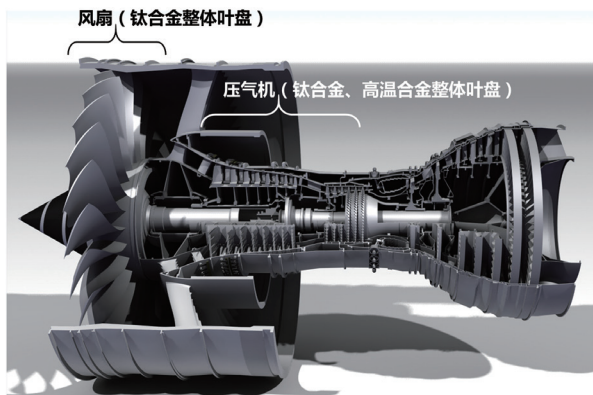


图2 典型商用航空发动机中的整体叶盘

体叶盘的性能和工作可靠性密切相关,对焊接工艺的要求很高,一般采用电子束焊、线性摩擦焊、真空固态扩散连结等^[2]。

目前,整体式是整体叶盘的主要形式,即从整体的锻造或铸造毛坯加工出叶型。根据商用航空发动机的性能要求,一般采用锻造工艺制造毛坯,加工方式主要有铣削加工及电化学加工,如图3所示。整体叶盘的加工程序主要包括毛坯的粗/精车、通道粗加工、叶片型面半精加工和精加工等,其中材料去除量大部分是通过通道粗加工完成。因此,实现通道高效粗加工,对于缩短整体叶盘制造周期、降低加工成本具有重要意义^[3]。

整体叶盘通道加工工艺方法

对于整体叶盘通道加工,可采用铣削加工、电火花加工、电化学加工等方法。下面对几种工艺方法及其研究应用现状进行介绍。

1 铣削加工(Milling)

铣削加工是目前最普遍的整体式叶盘加工工艺,对于通道加工,主要有侧铣、插铣和摆线铣几种不同的

铣削方式。

1.1 侧铣(Flank Milling)

传统的整体叶盘通道粗加工采用分层侧铣方式。图4为侧铣加工整体叶盘的示意图,侧铣加工时,刀具主要受径向力作用,随着通道铣削深度的逐步加深,刀具刚性变差,在径向力的作用下刀具容易变形、产生颤振,导致刀具磨损加剧,加工效率低,严重时,刀具发生断损,对保证生产安全和提高加工效率不利。

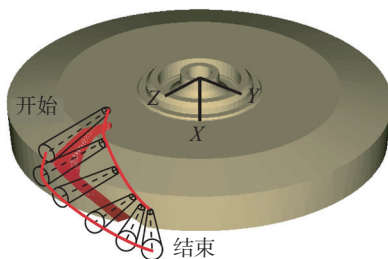


图4 侧铣加工整体叶盘示意图

1.2 插铣(Plunge Milling)

插铣是一种高效粗加工方法,被越来越广泛地应用于大余量复杂构件的粗加工过程。插铣又称Z轴铣削法,加工过程中,刀具沿刀轴方向做进给运动,利用底部切削刃进行钻、铣组合切削。如图5^[4]所示, a_c 为径向切深, S 为插铣侧向步距。整

体叶盘插铣粗加工采用直纹面逼近自由曲面,具有切削力相对稳定、刀具振动小等特点。试验研究证明,在增大侧向步距的情况下,插铣仍能保持平稳切削,而且刀具和零件的接触面切削温度低,十分适合进行钛合金、高温合金等难切削材料的高速切削,实现提高切削速度,降低刀具磨损,进而降低加工成本的目的。

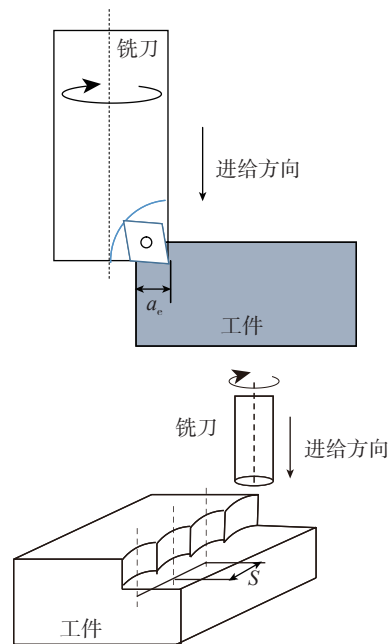


图5 插铣加工示意图

1.3 摆线铣(Trochoidal Milling)

摆线铣加工过程中,刀具在自转的同时,沿着由圆弧运动和直线运动合成的摆线轨迹进行走刀。摆线铣过程中刀具轨迹的参数方程为:

$$\begin{cases} x(t) = vt + R \cos(\omega t) \\ y(t) = R \sin(\omega t) \end{cases}$$

其中, v 是刀具沿直线运动的进给速度, ω 是刀具进行圆弧运动的角速度, R 是刀具圆弧运动的轨迹半径, t 为切削时间。

实际刀具的开槽切削宽度 $L=2R+D$ (D 为铣刀的有效切削半径)。

采用摆线形走刀方式,可以减小小刀具与工件的接触角,在实现相对较低的刀具磨损量的同时,得到较高的材料去除率。图6为摆线铣与传统

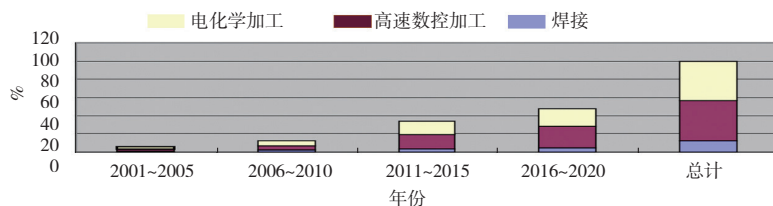
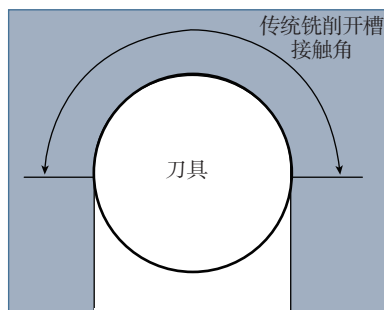
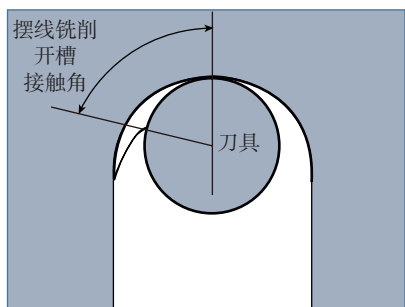


图3 整体叶盘加工方式发展



(a) 传统铣削



(b) 摆线铣削

图6 摆线铣削与传统铣削方法开槽加工时的接触角对比

铣削开槽加工时的接触角对比^[5]。

2 电火花加工(EDM)

在航空发动机加工领域,电火花加工一般用于加工涡轮叶片的气膜冷却孔,但是随着加工设备及技术的发展,电火花加工已经逐渐扩展到其他加工领域。电火花加工整体叶盘主要有电火花成形加工(Sinking-EDM)和线切割开槽加工(Wire-EDM)。电火花加工过程中存在电极损耗,会影响成型精度,需要经常更换电极,导致加工成本高,效率低下。同时加工表面的再铸层对零件的疲劳强度会产生不利影响,限制了此加工方法的推广使用。

3 电化学加工(ECM)

电化学加工是利用金属工件在电解液中发生阳极溶解的一种加工过程,如图7所示。电化学加工具有工具阴极无损耗、无宏观切削力、无热影响区等特点,在加工难切削材料工件方面,具有明显的优势。在整体叶盘电化学加工方面,目前主要有电解套料、仿形电解加工和数控电解加工等技术。

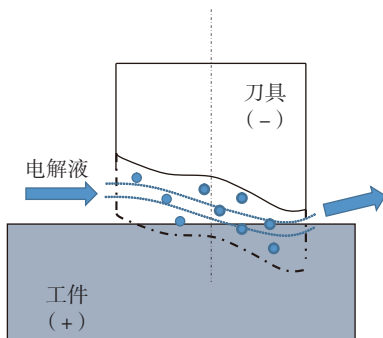


图7 电化学加工示意图

3.1 电解套料粗加工

电解套料加工最大的优点是加工效率高,且加工过程稳定,质量一致性好。在英、美、俄等国家已有成熟应用,国内航天企业也已普遍采用电解套料方法加工航天发动机整体叶盘^[5]。采用电解套料进行整体叶盘通道加工,尤其是镍基高温合金整体叶盘,能够充分发挥电解高效复制加工的优势。电解套料的局限在于只能加工等截面叶片整体叶盘,不能加工变截面扭曲叶片的整体叶盘。

3.2 仿形电解加工

仿形电解加工采用成形阴极,以拷贝的方式加工复杂型面,针对不同形状和尺寸的型面设计不同的阴极。仿形电解加工可加工变截面扭曲叶片的整体叶盘,加工速度快,加工精度较电解套料加工高,但是由于工具阴极与工装夹具的设计制造难度大,生产准备周期长,加工柔性低,一般不适合单件小批量生产,适用于批量生产。

3.3 数控电解加工

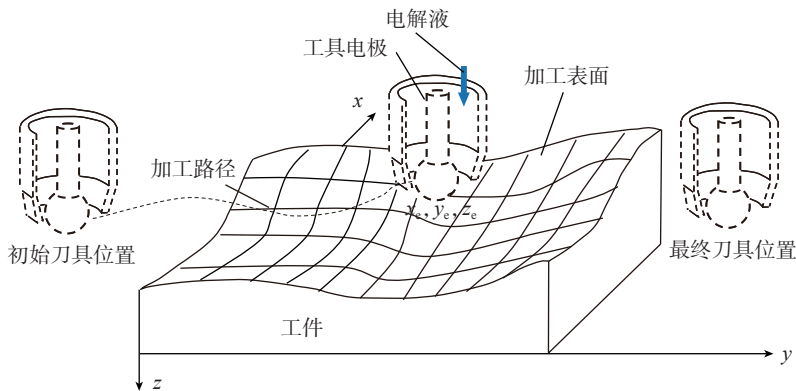


图8 数控电解加工曲面示意图

数控电解加工技术综合了数控加工和电解加工技术的特点,通过计算机控制简单形状的阴极完成电解加工,在工具阴极无损、无宏观切削力的情况下,以数控技术实现复杂叶片型面的加工,是一种优质、高效、具有快速响应能力的新加工技术,图8所示为数控电解加工曲面的示意图^[6]。

电化学加工目前的局限性在于加工精度还不够高,生产准备周期长,而且由于加工附属设备较多,对设备的刚性和耐腐蚀性要求较高,并且需要解决环境污染等问题^[7]。

整体叶盘通道粗加工工艺性分析

1 加工效率分析

相比侧铣,插铣具有更好的加工精度,同时可以提高切削速度,并增长刀具寿命。在国内,西北工业大学针对整体叶盘插铣加工做了大量研究,验证了插铣工艺的优越性,并实现了工程应用^[3-4]。通过直纹包络面逼近整体叶盘叶片的自由曲面,采用插铣工艺进行整体叶盘通道粗加工,与传统侧铣加工通道相比,插铣工艺径向切削力小(降低约60%),且分布比较均匀,能有效避免机床-刀具系统的振动,加工效率提升1倍以上,特别是对于刀具伸长量大的情况,效果尤其显著。插铣能够有效降低切削温度,在加工钛合金、高温合金等难加工材料时,可大幅提高刀具耐用

度,进而降低加工成本。

在摆线铣加工叶片通道的过程中,刀具的进给速度以及瞬时切屑厚度较小,在不同的圆弧运动周期内,切削力稳定,刀具不存在冲击,因此,摆线铣能够得到较好的加工质量,可以用于对质量要求较高的情况。摆线铣和插铣的共同特点是切削过程不连续,针对整体叶盘通道加工,摆线铣中刀具与零件接触角远远小于插铣加工,也能够大大降低刀具磨损率。但在相同加工工况要求下,摆线铣的加工轨迹与插铣相比要长很多,而且加工程序编制难度较插铣高,目前国内尚未实现工程应用。

直流电化学加工或脉冲电化学加工的材料去除率在给定电解液和电流密度的情况下,只与材料的电化学加工性能相关。Klocke^[8]通过试验采用圆柱工具电极和外冲刷方式,研究了多种钛合金及镍基合金的电化学可加工性。Ti-6Al-4V等钛合金的电化学有效材料去除率约为 $1.78\text{mm}^3/(\text{A}\cdot\text{min})$ 。对于镍基合金,晶粒尺寸越细小,电化学的可加工性越好,Inconel 718等镍基合金的电化学材料去除率约为 $1.51\text{mm}^3/(\text{A}\cdot\text{min})$ 。Klocke的研究显示,粉末合金具有较好的电化学加工性,材料去除率范围在 $1.77\sim 2.13\text{mm}^3/(\text{A}\cdot\text{min})$ 。

对于整体叶盘常见的两种材料,Ti-6Al-4V和Inconel 718,不同加工工艺进行简化通道粗加工的加工效率对比如表1所示^[9]。可以看出,对于Ti-6Al-4V材料,铣削加工材料去除率最高,而对于Inconel 718材料,电化学加工材料去除率较高。

表1 整体叶盘通道加工不同工艺的平均材料去除率

工艺方法	Ti-6Al-4V 材料去除率 / ($\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$)	Inconel 718 材料去除率 / ($\text{mm}^3\cdot\text{min}^{-1}$)
(摆线)铣削	6035	3401
电火花成形	220	500
电化学	4838	4163
线切割	3090	2388

2 经济性分析

对于商用航空发动机,制造成本是衡量工艺性的一个重要因素。整体叶盘的制造成本中,与原材料成本相比,加工成本占有很大比重,因此降低加工成本是降低整体叶盘成本的主要途径。Klocke基于简化的整体叶盘通道几何模型,分析了摆线铣、电火花线切割、电化学加工Inconel 718和Ti-6Al-4V两种材料整体叶盘通道的经济性,该研究针对批量生产的整体叶盘加工成本进行分析,认为对于Ti-6Al-4V的整体叶盘,铣削加工和电化学加工经济性最高,对于年产量超过400的Inconel 718材料整体叶盘加工来说,电化学加工是经济性最高的工艺,虽然电化学加工是经济性最高的工艺,虽然电化学加工工具电极的设计制造成本较高,但在加工过程中损耗少,因此十分适合批产加工。

结束语

高性能商用航空发动机的发展越来越依赖于先进材料和工艺的进步。在保证发动机性能质量和可靠性的同时,降低发动机制造成本和提高市场竞争力,对发动机关键零件的关键加工工艺提出了更高的要求。实现整体叶盘通道高效粗加工对于缩短整体叶盘制造周期,降低加工成本具有很重要的意义。本文分析了国内外整体叶盘通道加工工艺方法的技术特点、研究进展以及工艺特点及经济性对比。通过分析可以看出,对于钛合金整体叶盘,从工艺性及经济性考虑,铣削加工是适合的加工方法,并且插铣加工及摆线铣加工均可

以用于通道加工。对于镍基高温合金材料的整体叶盘,电化学加工可以实现较高的材料去除率,对于批量生产的镍基高温合金材料的整体叶盘,电化学加工的经济性更好。

国内针对整体叶盘通道粗加工进行了大量研究,其中插铣加工已经实现了工程化应用,在刀轴控制、加工路径设计和加工参数优化等关键技术方面都取得了一定的进展。对于电化学加工,目前国外已经实现成熟应用,而国内仍处于实验室研究阶段,电极的设计技术、加工参数优化技术以及加工质量的控制技术,与国外仍存在较大的差距。

参考文献

- [1] Bußmann M, Kraus J, Bayer E. An integrated cost-effective approach to blisk manufacturing//Proceedings of 17th Symposium on Air Breathing Engines. München, 2005:1-9.
- [2] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术. 航空制造技术, 2006(4), 94-100.
- [3] 任军学, 田卫军, 田荣鑫, 等. 开式整体叶盘通道侧铣粗加工技术的研究. 机械科学与技术, 2008, 27(10), 1220-1224.
- [4] 任军学, 姜振南, 姚倡锋, 等. 开式整体叶盘四坐标高效开槽插铣工艺方法. 航空学报, 2008, 29(6), 1692-1698.
- [5] 张明岐, 傅军英. 高温合金整体叶盘精密振动电解加工方法的应用分析. 航空制造技术, 2009(22), 26-29.
- [6] 吴建民. 大直径整天叶轮数控电解加工技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [7] 徐家文, 云乃彰, 严德荣. 数控电解加工整体叶盘的研究、应用和发展. 航空制造技术, 2003(6):31-34.
- [8] Klocke F, Zeisa M, Klinka A, et al. Experimental research on the electrochemical machining of modern titanium-and nickel-based alloys for aero engine components. Procedia CIRP, 2013(6):368-372.
- [9] Klocke F. Technological and economical comparison of roughing strategies via milling, EDM and ECM for titanium and nickel-based blisks. Procedia CIRP, 2012(6):98-101.

(责编 玲犀)